

# 激光与光电子学进展

## RIE 工艺参数对 4H-SiC 刻蚀速率和表面粗糙度的影响

万泽洪<sup>1</sup>, 崔恩康<sup>1</sup>, 于圣韬<sup>2</sup>, 雷宇<sup>2</sup>, 桂成群<sup>1</sup>, 周圣军<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>武汉大学工业科学研究所, 湖北 武汉 430072;

<sup>2</sup>武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072

**摘要** 基于 4H-SiC 材料的微机电系统(MEMS)器件(如压力传感器、微波功率半导体器件等)在制造过程中,需要利用干法刻蚀技术对 4H-SiC 材料进行微加工。增加刻蚀速率可以提高加工效率,但是调节刻蚀工艺参数在改变 4H-SiC 材料刻蚀速率的同时,也会对刻蚀表面粗糙度产生影响,进而影响器件的性能。为了提高 SiC 材料的刻蚀速率并降低刻蚀表面粗糙度,满足 4H-SiC MEMS 器件研制的需求,本文通过优化光刻工艺参数(曝光模式、曝光时间、显影时间)获得了良好的光刻图形形貌,改善了刻蚀掩模的剥离效果。实验中采用 SF<sub>6</sub>和 O<sub>2</sub>作为刻蚀气体,镍作为刻蚀掩模,分析了 4H-SiC 反应离子刻蚀工艺参数(刻蚀气体含量、腔体压强、射频功率)对 4H-SiC 刻蚀速率和表面粗糙度的影响。实验结果表明,通过优化干法刻蚀工艺参数可以获得原子级平整的刻蚀表面。当 SF<sub>6</sub>的流量为 330 mL/min, O<sub>2</sub>流量为 30 mL/min,腔体压强为 4 Pa,射频功率为 300 W 时,4H-SiC 材料的刻蚀速率可达到 292.3 nm/min,表面均方根粗糙度为 0.56 nm。采用优化的刻蚀工艺参数可以实现 4H-SiC 材料的高速率、高质量加工。

**关键词** 材料; 碳化硅; 光刻; 反应离子刻蚀; 刻蚀速率; 表面粗糙度

**中图分类号** TN305      **文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP202158.1922002

## Effects of Reactive Ion Etching Parameters on Etching Rate and Surface Roughness of 4H-SiC

Wan Zehong<sup>1</sup>, Cui Enkang<sup>1</sup>, Yu Shengtao<sup>2</sup>, Lei Yu<sup>2</sup>, Gui Chengqun<sup>1</sup>, Zhou Shengjun<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>The Institute of Technological Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

<sup>2</sup>School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China

**Abstract** Dry etching is required to microfabricate 4H-SiC-based microelectromechanical system (MEMS) devices, such as pressure sensors and microwave power semiconductor devices. The processing efficiency can be boosted by improving the etching rate. However, adjusting the etching rate of 4H-SiC by manipulating etching process parameters not only changes the etched surface roughness, but also impacts the surface roughness of the etched surface. To achieve excellent pattern morphology and improve the etching mask lift-off quality while simultaneously improving the etching rate and reducing the surface roughness need of 4H-SiC, we optimized the photolithography process parameters, including exposure mode, exposure time, and development time, to meet the development need of 4H-SiC MEMS devices. We investigated the effects of etching process parameters (such as etching gas content, chamber pressure, and radio-frequency power) on etching rate and surface roughness in reactive

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-01-29; 录用日期: 2021-02-04

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104900)、国家自然科学基金(52075394, 51675386, 51775387)

通信作者: \*zhousj@whu.edu.cn

ion etching (RIE) with  $\text{SF}_6$  and  $\text{O}_2$  as etching gas and Ni as an etching mask. The results show that a flat atomic surface can be achieved by optimizing etching process parameters. The etching rate of 4H-SiC is 292.3 nm/min and root-mean-square (RMS) roughness is 0.56 nm when the flow of  $\text{SF}_6$  and  $\text{O}_2$  is 330 and 30 mL/min, respectively, the chamber pressure is 4 Pa, and RF power is 300 W. High-quality etched surfaces with a high etching rate can be obtained using optimized etching process parameters.

**Key words** materials; silicon carbide; lithography; reactive ion etching; etching rate; surface roughness

**OCIS codes** 160.6000; 350.3850; 220.3740; 220.4000

## 1 引言

碳化硅(SiC)作为第三代半导体材料,具有宽禁带、耐高温、耐腐蚀、击穿场强大等特点,是制作恶劣环境下工作器件或大功率电子器件的理想材料<sup>[1-3]</sup>。SiC良好的力学性能和稳定的化学性能决定了它很难采用传统的湿法刻蚀进行加工,因此,通常采用激光或等离子体干法刻蚀对其进行加工。激光加工刻蚀具有速率快、效率较高等优点,但加工过程中存在熔渣、热影响区等缺陷,加工质量较差<sup>[4]</sup>。等离子体干法刻蚀已被国内外科研人员广泛研究,并被认为是加工SiC材料最有前景的技术之一<sup>[5]</sup>。

加工SiC材料的干法刻蚀技术包括反应离子刻蚀(RIE)<sup>[6-9]</sup>、电感耦合等离子体(ICP)<sup>[10-13]</sup>刻蚀、中性环路放电(NLD)等离子体刻蚀<sup>[14-15]</sup>等。刻蚀气体通常采用 $\text{SF}_6$ <sup>[9-10,12]</sup>、 $\text{CF}_4$ <sup>[11]</sup>、 $\text{CHF}_3$ <sup>[7]</sup>、 $\text{NF}_3$ <sup>[16]</sup>、 $\text{Cl}_2$ <sup>[17-18]</sup>等,而辅助刻蚀气体通常采用 $\text{O}_2$ 、氩气、HBr等,其中: $\text{O}_2$ 能够促进非挥发性反应产物的二次反应,生成挥发性气体<sup>[19]</sup>;氩气能够促进SiC的物理刻蚀<sup>[20]</sup>;HBr能够改善SiC刻蚀微沟槽现象<sup>[18,21]</sup>。刻蚀掩模材料主要有光刻胶、铝、镍等。ICP刻蚀对光刻胶和4H-SiC材料的刻蚀选择比较低,通常在浅刻蚀(500 nm~1  $\mu\text{m}$ )时采用光刻胶作为掩模<sup>[22-23]</sup>。ICP刻蚀对铝和4H-SiC材料的刻蚀选择比最高可达150,但刻蚀选择比随 $\text{O}_2$ 含量变化的波动性较大;而且,采用铝做掩模时,铝易溅射到SiC刻蚀表面形成二次微掩模,对SiC刻蚀表面的质量不利<sup>[22]</sup>。ICP刻蚀对镍和4H-SiC材料的刻蚀选择比在30~70之间,镍是目前SiC刻蚀常用的掩模材料,刻蚀后容易去除<sup>[22,24]</sup>。此外,还有研究人员采用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[12]</sup>和铜<sup>[14]</sup>作为SiC干法刻蚀掩模材料。

目前,研究人员已从刻蚀机理、刻蚀速率、等离子体刻蚀对掩模和SiC材料的刻蚀选择比以及掩模材料对刻蚀形貌的影响等方面研究了SiC干法刻蚀。SaifAddin等<sup>[24]</sup>研究了刻蚀气体流量、刻蚀时间、射频功率等参数对6H-SiC刻蚀速率的影响。

Ito等<sup>[19]</sup>采用 $\text{SF}_6/\text{O}_2$ 气体刻蚀SiC材料,详细分析了4H-SiC材料的刻蚀机理。Li等<sup>[12]</sup>研究了不同刻蚀掩模材料对4H-SiC刻蚀表面形貌的影响,结果发现采用Ni/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 作为刻蚀掩模能够有效降低4H-SiC刻蚀表面的粗糙度。Zhuang等<sup>[21]</sup>在 $\text{SF}_6$ 刻蚀气体中添加HBr、 $\text{O}_2$ 、氩气等辅助刻蚀气体,通过调节刻蚀气体组分、腔体压强、射频功率等参数实现了对4H-SiC底部微沟槽形貌的控制。Osipov等<sup>[25]</sup>研究了托盘温度对6H-SiC刻蚀速率及表面粗糙度的影响。Liu等<sup>[5]</sup>通过调节光刻和ICP刻蚀工艺加工出了角度可控的4H-SiC倾斜侧壁。Kathalingam等<sup>[18]</sup>和Choi等<sup>[26]</sup>利用干法刻蚀的微掩模现象生长出了不同长径比的4H-SiC纳米线。

为了提高4H-SiC的刻蚀速率、降低刻蚀表面的均方根(RMS)粗糙度,本课题组通过调节光刻工艺参数获得了良好的光刻形貌,改善了刻蚀掩模的剥离效果;同时,分析了RIE工艺参数对4H-SiC刻蚀速率和刻蚀表面粗糙度的影响,并获得了4H-SiC材料的最佳刻蚀工艺参数。

## 2 实验

采用北京天科合达半导体股份有限公司生产的N型掺杂4H-SiC衬底进行实验,掺杂元素为氮原子,掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,厚度为350  $\mu\text{m}$ ,碳面的表面粗糙度 $R_a \leq 1 \text{ nm}$ ,硅面的表面粗糙度 $R_a \leq 0.5 \text{ nm}$ 。采用金刚石刀具将4H-SiC衬底切割成13 mm  $\times$  13 mm的小片。实验流程如图1所示,具体包括4H-SiC衬底清洗、匀胶、曝光、显影、镀膜、剥离、RIE刻蚀等步骤。

在上述实验流程中,Step 1采用RCA(Radio Corporation of America)清洗法,具体步骤如下:1)依次采用丙酮、乙醇、去离子水清洗5 min,然后用缓冲氧化物刻蚀液(BOE)清洗8 min;2)采用80  $^\circ\text{C}$  Piranha溶液清洗15 min;3)采用60  $^\circ\text{C}$  SC-1溶液清洗15 min;4)采用60  $^\circ\text{C}$  SC-2溶液清洗15 min;5)采用稀氢氟酸清洗2 min。Step 2的匀胶工艺参数如下:前

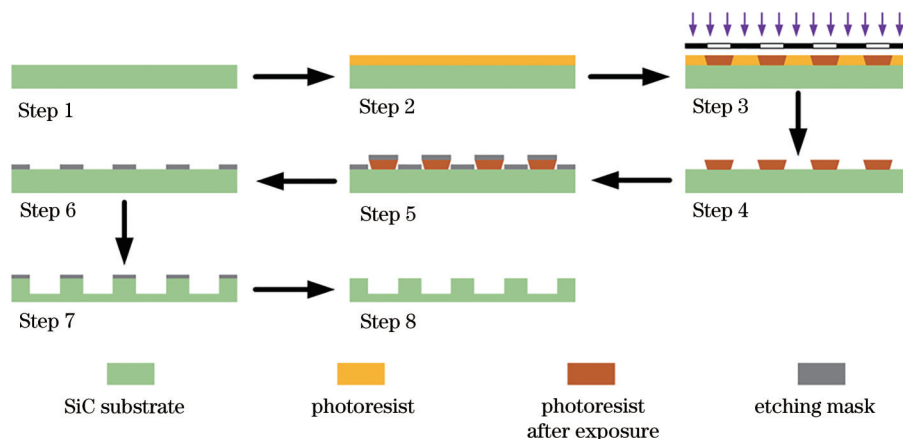


图 1 实验流程示意图 (Step 1: 4H-SiC 衬底清洗; Step 2: 匀胶; Step 3: 曝光; Step 4: 显影; Step 5: 镀膜; Step 6: 剥离; Step 7: RIE 刻蚀; Step 8: 去除掩模并清洗 4H-SiC 衬底)

Fig. 1 Schematic illustration of experimental flow (Step 1: 4H-SiC substrate cleaning; Step 2: photoresist spin coating; Step 3: exposure; Step 4: development; Step 5: coating; Step 6: lift-off; Step 7: RIE; Step 8: mask removing and 4H-SiC substrate cleaning)

转转速 600 r/min, 持续 9 s, 后转转速 4000 r/min, 持续 60 s。匀胶后在 105 °C 下烘烤光刻胶 90 s (前烘), 以降低光刻胶中的溶剂含量。在 Step 3 中采用接触式紫外曝光设备 H94-27 型光刻机进行曝光, 曝光功率密度为 5 mW/cm<sup>2</sup>, 曝光时间调节范围为 5~20 s。曝光后的光刻胶在 105 °C 下烘烤 90 s (后烘), 以降低驻波效应的影响。在 Step 4 中采用 RZX-3038 显影液进行显影处理, 显影时间调节范围为 16~20 s。在 Step 5 中采用 Ohmiker-50B 电子束蒸发设备在 SiC 表面蒸镀厚度为 200 nm 的金属镍作为刻蚀掩

模。在 Step 6 中采用丙酮溶液溶解光刻胶, 剥离金属。在 Step 7 中采用 RIE 设备对 4H-SiC 材料进行刻蚀, 刻蚀气体为 SF<sub>6</sub> 和 O<sub>2</sub>, 气体总流量为 360 mL/min, O<sub>2</sub> 体积分数的调节范围为 0~70%, 腔体内压强的调节范围为 4~10 Pa, 射频功率调节范围为 200~400 W。在 Step 8 中采用 RCA 清洗法去除残余金属掩模。此外, 在 Step 6 剥离、Step 7 RIE 刻蚀以及 Step 8 清洗工艺之后均采用 KLA-Tencor AlphaStep 台阶仪测量掩模厚度和刻蚀深度, 测量示意图如图 2 所示。

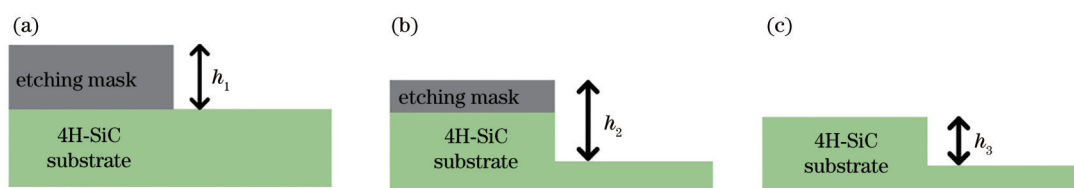


图 2 台阶高度测量示意图。(a) 剥离之后, 掩模与 4H-SiC 衬底之间的台阶高度  $h_1$ ; (b) RIE 刻蚀之后, 掩模与 4H-SiC 刻蚀表面之间的台阶高度  $h_2$ ; (c) 去除掩模后, 4H-SiC 未刻蚀表面与 4H-SiC 刻蚀表面之间的台阶高度  $h_3$

Fig. 2 Schematic illustration of step height measurement. (a) Step height  $h_1$  between mask and 4H-SiC substrate after lift-off; (b) step height  $h_2$  between the mask and 4H-SiC etched surface after RIE etching; (c) step height  $h_3$  between 4H-SiC unetched surface and 4H-SiC etched surface after mask removal

### 3 结果与讨论

#### 3.1 光刻与剥离实验

光刻胶图形化效果会对剥离效果产生很大影响, 进而影响后续 RIE 刻蚀实验。本实验首先通过对比不同型号光刻胶显影后的形貌来选择一种合适的光刻胶, 然后分析曝光模式、曝光时间、显影时

间对光刻形貌及剥离效果的影响, 最后得出最佳的光刻工艺参数。

##### 3.1.1 光刻胶型号

为了实现良好的剥离效果, 要求显影后的光刻胶横截面呈“倒梯形”, 并且具有足够的厚度<sup>[27]</sup>。图 3 分别为 S1818、AR-N4340、ROL-7133 及 AZ2070 型光刻胶在曝光显影后的扫描电子显微镜 (SEM) 图,

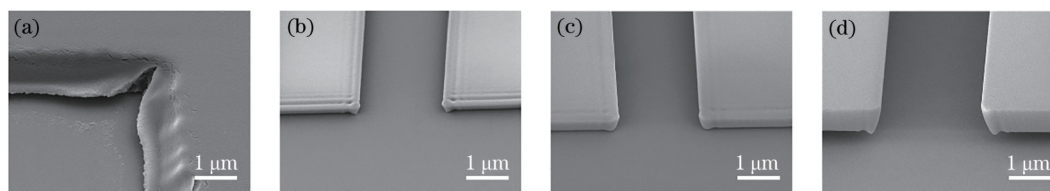


图3 不同型号光刻胶曝光显影后的SEM图。(a) S1818型光刻胶;(b) AR-N4340型光刻胶;(c) ROL-7133型光刻胶;(d) AZ2070型光刻胶

Fig. 3 SEM images of different photoresists after exposure and development. (a) S1818 photoresist; (b) AR-N4340 photoresist; (c) ROL-7133 photoresist; (d) AZ2070 photoresist

其中S1818为正性光刻胶,其余三种均为负性光刻胶。从图3可以看出,负性光刻胶在曝光显影后均呈明显的“倒梯形”,并且在相同的匀胶工艺参数下,AR-N4340型光刻胶最薄,AZ2070型光刻胶最厚。由于剥离工艺要求光刻胶具有足够的厚度<sup>[27]</sup>,因此优先采用ROL-7133和AZ2070型光刻胶。然而,AZ2070型光刻胶出现了浮胶现象,与4H-SiC衬底的黏附性能相对较差,这会导致蒸镀金属镍时出现卷曲现象。因此,本实验中采用ROL-7133型光刻胶。

### 3.1.2 曝光模式

光刻机的曝光模式会影响光刻图形的分辨

率<sup>[28]</sup>,通过调节接触/分离间隙及密着真空度可以实现软接触、硬接触及微力接触三种不同的曝光模式。图4(b)为微力接触曝光模式下图形化光刻胶的光学显微镜图,该曝光模式下的接触/分离间隙较大,密着真空度大于 $-0.02$  MPa,光刻图形边界分辨率低;图4(c)为软接触曝光模式下图形化光刻胶的光学显微镜图,该曝光模式下的接触/分离间隙较小,密着真空度在 $-0.02 \sim -0.05$  MPa之间,光刻图形的边界分辨率明显提高。可见,通过调节接触/分离间隙和密着真空度,可以有效改善光刻效果。

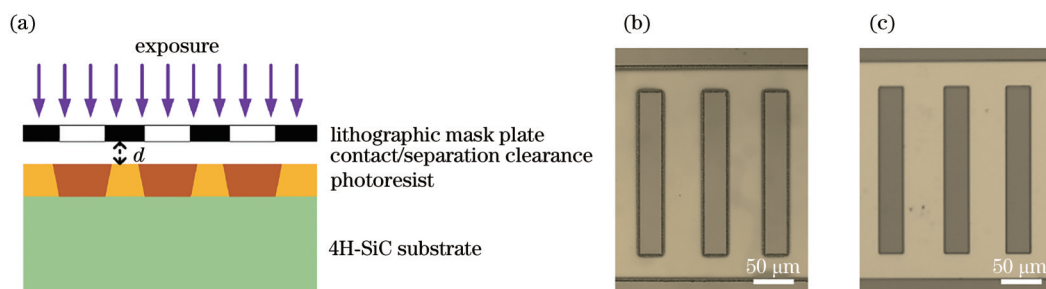


图4 曝光模式对光刻效果的影响。(a)紫外曝光示意图;(b)微力接触曝光模式下图形化光刻胶的光学显微镜图;(c)软接触曝光模式下图形化光刻胶的光学显微镜图

Fig. 4 Influence of exposure mode on photolithography. (a) Schematic illustration of exposure; (b) optical microscopy image of graphic photoresist in micro-force contact exposure mode; (c) optical microscopy image of graphic photoresist in soft contact exposure mode

### 3.1.3 曝光时间和显影时间

曝光时间和显影时间分别从光刻胶曝光程度和去除程度两方面影响光刻胶的图形化效果。图5(a)~(c)是曝光时间分别为5,10,20 s,显影时间为20 s时所得图形化光刻胶的光学显微镜图。从图中可以看出,曝光程度随着曝光时间的延长而增大,有效改善了光刻胶的图形化效果。图5(d)~(e)是曝光时间为20 s,显影时间分别为16 s和20 s时所得图形化光刻胶的光学显微镜图。从图中可以看出,延长显影时间能够有效提高光刻图形边界的分辨率。

图6为光刻效果差和光刻效果好的4H-SiC衬底在镀膜与剥离之后所得刻蚀掩模的光学显微镜图。从图中可以看出,通过调节光刻工艺参数可以获得良好的光刻形貌,能够有效改善刻蚀掩模的剥离效果。

## 3.2 RIE刻蚀实验

首先对比4H-SiC衬底碳面和硅面的RIE刻蚀差异性,目的是选择合适的刻蚀面;然后研究不同刻蚀时间下刻蚀速率、RIE对镍和4H-SiC的刻蚀选择比以及4H-SiC刻蚀表面质量的变化,以选择合适的刻蚀时间;最后调节 $O_2$ 含量、RIE设备的腔体压



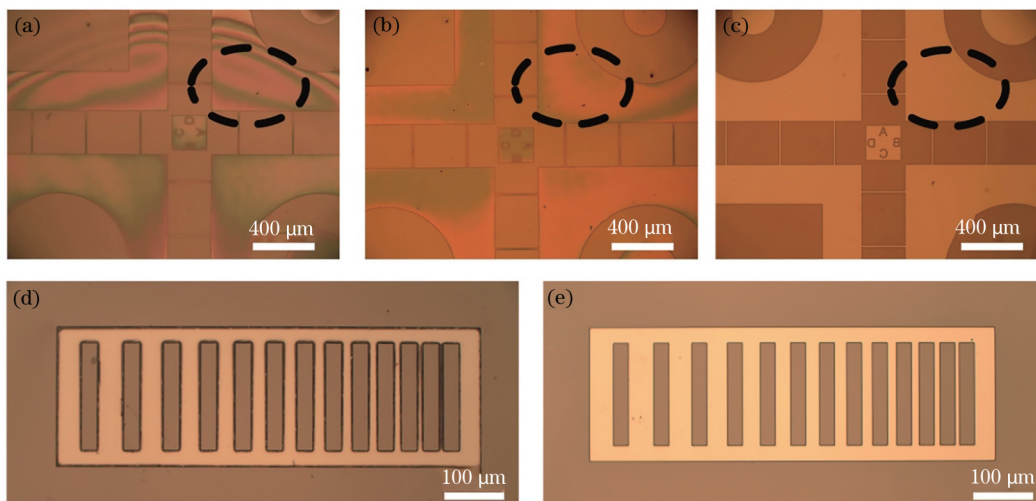


图 5 不同曝光时间和显影时间下图形化光刻胶的光学显微镜图。(a)~(c)曝光时间分别为 5,10,20 s,显影时间为 20 s; (d)~(e)曝光时间为 20 s,显影时间分别为 16 s 和 20 s

Fig. 5 Optical microscopy images of patterned photoresist with different exposure time and development time. (a)–(c) Exposure time is 5, 10, and 20 s, respectively, and development time is kept at 20 s; (d)–(e) exposure time is kept at 20 s, and development time is 16 and 20 s, respectively

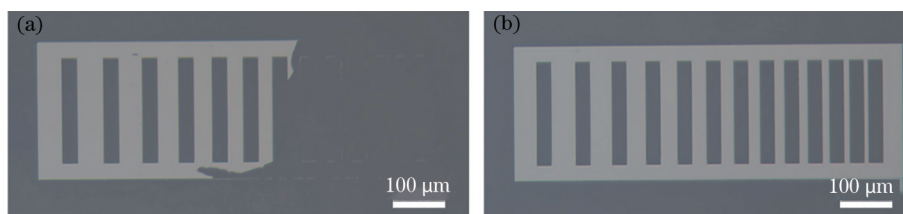


图 6 光刻效果差和光刻效果好的 4H-SiC 衬底在镀膜与剥离之后所得刻蚀掩模的光学显微镜图。(a)光刻效果差; (b)光刻效果良好

Fig. 6 Optical microscopy images of etching masks obtained after coating and lift-off of 4H-SiC substrates with poor and good lithographic quality. (a) Poor lithographic quality; (b) good lithographic quality

强及射频功率等工艺参数,分析不同工艺条件对 4H-SiC 刻蚀速率和刻蚀表面粗糙度的影响。

### 3.2.1 4H-SiC 衬底碳面和硅面的刻蚀差异性

实验中设置 SF<sub>6</sub> 流量为 300 mL/min, O<sub>2</sub> 流量为 60 mL/min, 腔体压强为 9 Pa, 射频功率为 300 W, 温度为 20 °C。图 7 为 4H-SiC 衬底碳面和硅面刻蚀后的 SEM 图,可以看出对碳面进行刻蚀会出现明显

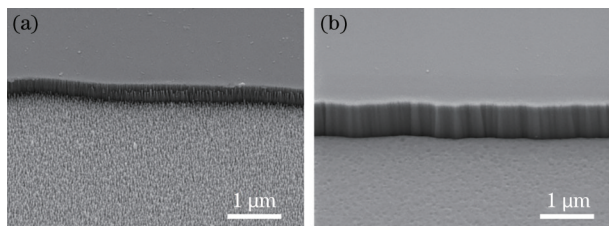


图 7 4H-SiC 衬底刻蚀后的 SEM 图。(a)碳面; (b)硅面  
Fig. 7 SEM images of 4H-SiC substrate after etching.  
(a) C-face; (b) Si-face

的刻蚀残留物(“草地”现象)。刘益宏等<sup>[9]</sup>认为这些锥状物表面主要由 Si 原子和少量 C 原子组成,其成因与 4H-SiC 的晶体结构有关。通过调节刻蚀工艺参数,可以改变锥状物的密度及高度,在一定程度上消除“草地”现象。为了减小 RIE 刻蚀残留物的影响,降低 SiC 刻蚀表面的粗糙度,后续 RIE 刻蚀实验均在硅面上进行。

### 3.2.2 刻蚀时间的影响

实验中设置 SF<sub>6</sub> 流量为 300 mL/min, O<sub>2</sub> 流量为 60 mL/min, 腔体压强为 9 Pa, 射频功率为 300 W, 温度为 20 °C, 刻蚀时间分别为 200, 400, 600 s。根据图 2 所测量的三个高度差可以计算出 4H-SiC 衬底的刻蚀速率  $v_{SiC}$ 、镍掩模的刻蚀速率  $v_{Ni}$  以及 RIE 对镍和 4H-SiC 的刻蚀选择比  $\delta$ 。计算公式为

$$v_{SiC} = \frac{h_{SiC}}{t_0} = \frac{h_3}{t_0}, \quad (1)$$

$$\nu_{Ni} = \frac{h_{Ni}}{t_0} = \frac{h_1 - (h_2 - h_3)}{t_0}, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{\nu_{SiC}}{\nu_{Ni}} = \frac{h_3}{h_1 - (h_2 - h_3)}, \quad (3)$$

式中： $h_{SiC}$ 、 $h_{Ni}$  分别为 4H-SiC 衬底和镍掩模的刻蚀厚度； $h_1$ 、 $h_2$  和  $h_3$  分别为图 2 所示的三个台阶高度； $t_0$  为刻蚀时间。图 8(a)~(c) 为不同刻蚀时间下台阶高度  $h_3$  的测量曲线，图 8(d)~(f) 为不同刻蚀时间下

4H-SiC 衬底刻蚀表面的 SEM 图，图 8(g)~(i) 分别为 4H-SiC 衬底和镍掩模的刻蚀速率以及 RIE 对镍和 4H-SiC 的刻蚀选择比随时间变化的曲线图。从图中可以看出，4H-SiC 刻蚀表面质量随刻蚀时间的延长而逐渐提高，4H-SiC 刻蚀速率随刻蚀时间的延长而逐渐增大，镍掩模刻蚀速率随刻蚀时间延长呈现先增大后稳定的趋势，RIE 对镍和 4H-SiC 的刻蚀选择比随刻蚀时间延长而减小，并逐渐趋于稳定。

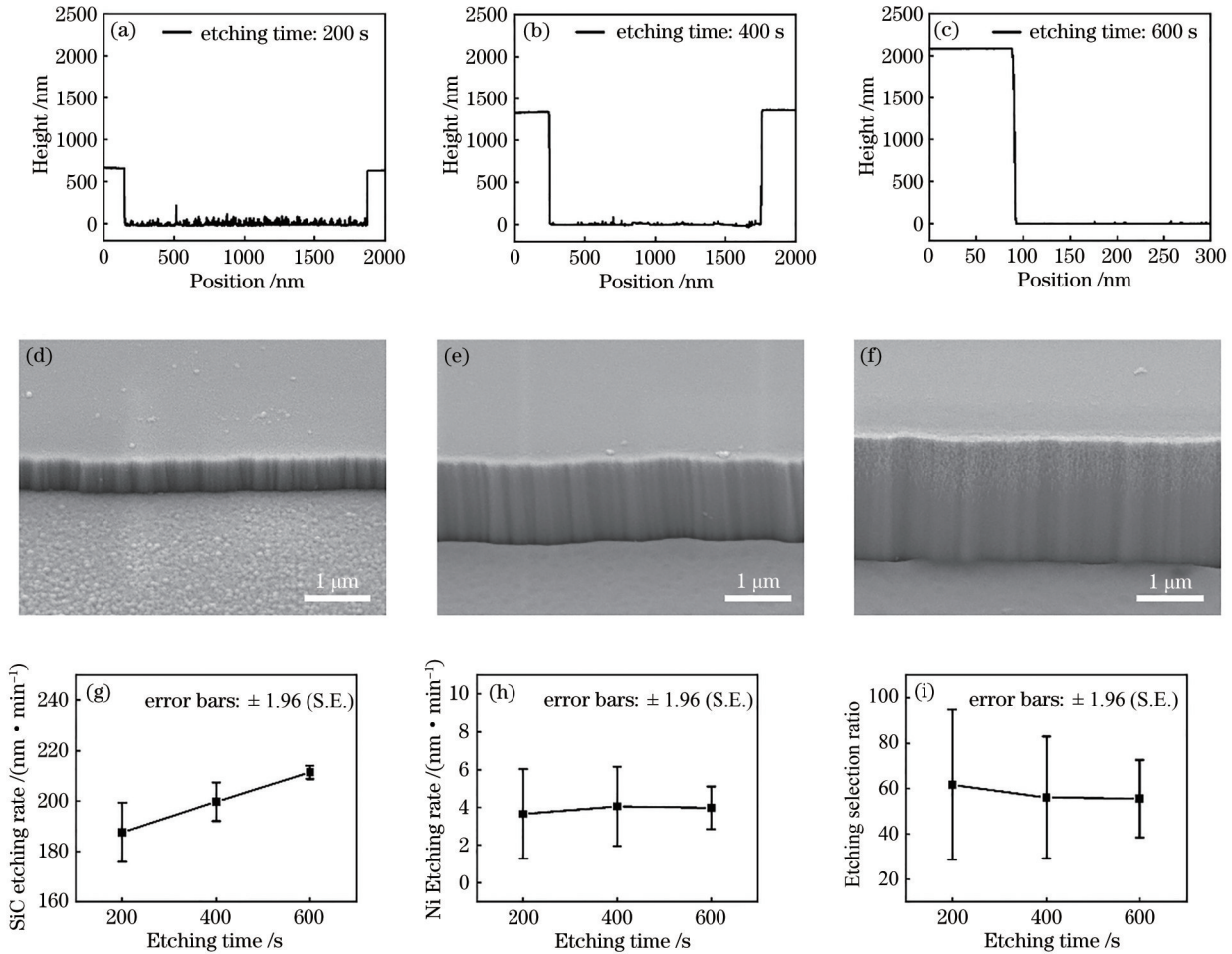


图 8 刻蚀时间的影响。(a)~(c) 台阶仪测量高度差  $h_3$ ；(d)~(f) 刻蚀 200, 400, 600 s 后, SiC 的 SEM 图；(g) 4H-SiC 衬底的刻蚀速率；(h) 镍掩模的刻蚀速率；(i) RIE 对镍和 4H-SiC 的刻蚀选择比

Fig. 8 Influence of etching time. (a)–(c) Height difference  $h_3$  measured by step profiler; (d)–(f) SEM images of SiC with etching time of 200, 400, and 600 s, respectively; (g) etching rate of 4H-SiC substrate; (h) etching rate of Ni mask; (i) RIE etching selection ratio of Ni to 4H-SiC

4H-SiC 刻蚀速率和表面质量随刻蚀时间发生变化,这可能是由于 4H-SiC 衬底表面在刻蚀前存在某种有机杂质,如 Step 6 剥离工艺完成后残留在 4H-SiC 衬底表面的光刻胶等。残余光刻胶对 SiC 的刻蚀速率及刻蚀表面粗糙度产生了较大影响,使得在测量台阶高度  $h_1$ 、 $h_2$  和  $h_3$  时的实际情况并不是图 2 所示的理想情况,而是图 9 所示情况。此时(1)~(3)式分别变为

$$\nu_{SiC}' = \frac{h_{SiC}'}{t_0'} = \frac{h_3}{t_0 - t_{Pr}}, \quad (4)$$

$$\nu_{Ni}' = \frac{h_{Ni}'}{t_0'} = \frac{h_1 + h_{Pr} - (h_2 - h_3)}{t_0}, \quad (5)$$

$$\delta' = \frac{\nu_{SiC}'}{\nu_{Ni}'} = \frac{t_0 h_3}{t_0 [h_1 - (h_2 - h_3)] + (t_0' h_{Pr} - t_{Pr} h_{Ni})}, \quad (6)$$

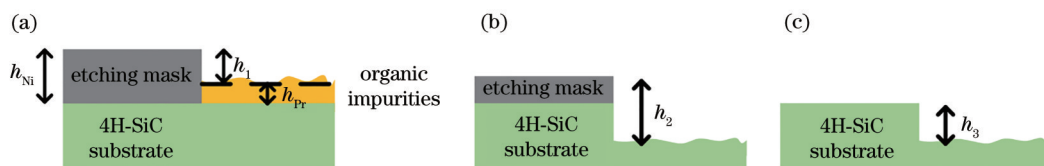


图 9 台阶高度测量的实际情况示意图。(a)剥离后台阶高度  $h_1$ ; (b)RIE 刻蚀后台阶高度  $h_2$ ; (c)去除掩模后台阶高度  $h_3$   
 Fig. 9 Schematic illustration of actually measured step height. (a) Step height  $h_1$  after lift-off; (b) step height  $h_2$  after RIE etching; (c) step height  $h_3$  after removal of mask

式中： $\nu_{SiC}'$ 、 $\nu_{Ni}'$  分别为 4H-SiC 衬底和镍掩模的实际刻蚀速率； $t_0'$  为 4H-SiC 衬底的实际刻蚀时间； $h_{pr}$  为 4H-SiC 衬底表面有机杂质的厚度； $t_{pr}$  为刻蚀有机杂质的时间； $h_{Ni}'$  为镍掩模的实际刻蚀厚度； $\delta'$  为真实的刻蚀选择比。由 (4)~(6) 式可知，依据 (1)~(3) 式得到的 4H-SiC 衬底和镍掩模的刻蚀速率的计算值比实际值小，且随着刻蚀时间的延长，该偏差逐渐减小。此外，由于有机杂质的厚度  $h_{pr}$  和刻蚀时间  $t_{pr}$  均为一个随机变量，因此 4H-SiC 衬底、镍掩模的刻蚀速率以及 RIE 对镍和 4H-SiC 的刻蚀选择比均存在较大波动。

为了解决这一问题，在 RIE 刻蚀之前增加氧等

离子体清洗工艺，将有机杂质的影响降到最低，然后重复上述 RIE 刻蚀实验。氧等离子体清洗工艺参数如下： $O_2$  流量为 300 mL/min，腔体压强为 1.25 Pa，射频功率为 100 W，温度为 20 °C，清洗时间为 500 s。图 10(a)~(c) 分别为改进工艺后 4H-SiC 衬底的刻蚀速率、镍掩模的刻蚀速率，以及 RIE 对镍和 4H-SiC 的刻蚀选择比随时间变化的曲线图，图 10(d)~(f) 为不同刻蚀时间下 4H-SiC 衬底刻蚀表面的 SEM 图。从图中可以看出：4H-SiC 衬底的刻蚀速率约为 220 nm/min，镍掩模的刻蚀速率约为 4 nm/min，RIE 对 Ni 和 4H-SiC 的刻蚀选择比约为 55；随着刻蚀时间延长，4H-SiC 衬底表面无刻蚀残留物产生。

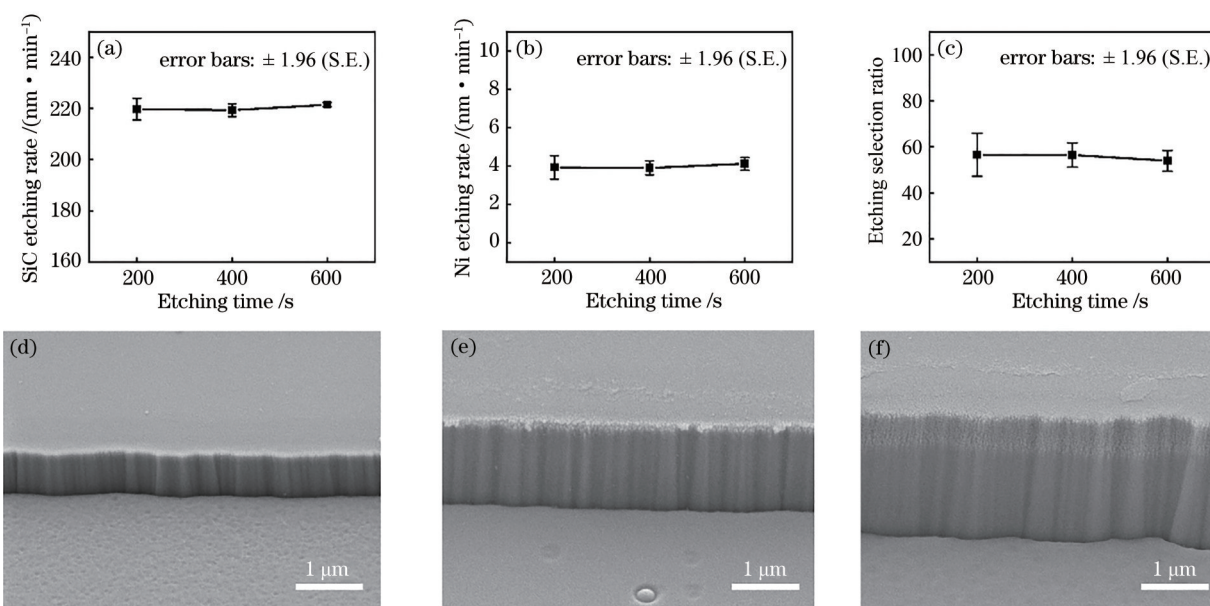


图 10 改进工艺后刻蚀时间的影响。(a) 4H-SiC 衬底的刻蚀速率；(b) 镍掩模的刻蚀速率；(c) RIE 对镍和 4H-SiC 的刻蚀选择比；(d)~(f) 刻蚀 200, 400, 600 s 后 SiC 的 SEM 图  
 Fig. 10 Influence of etching time after process improvement. (a) Etching rate of 4H-SiC substrate; (b) etching rate of Ni mask; (c) RIE etching selection ratio of Ni to 4H-SiC; (d)~(f) SEM images of SiC after etching 200, 400, and 600 s, respectively

### 3.2.3 $O_2$ 含量对 4H-SiC 刻蚀速率及表面粗糙度的影响

实验中设置 RIE 刻蚀气体为  $SF_6$  和  $O_2$ ，气体总

流量为 360 mL/min，腔体压强为 9 Pa，温度为 20 °C，射频功率为 300 W， $O_2$  体积分数从 0 逐渐增加到 70%。图 11 显示了  $O_2$  含量对 4H-SiC 刻蚀速率



及刻蚀表面粗糙度的影响。从图中可以看出,随着  $O_2$  含量增加,4H-SiC 刻蚀速率呈现先增大后减小的趋势,刻蚀表面 RMS 粗糙度则呈现先减小后增大的趋势。当  $O_2$  体积分数为 8.3% 时,4H-SiC 的刻蚀速率最大(245.7 nm/min),刻蚀表面 RMS 粗糙度最小(1.43 nm)。当  $O_2$  体积分数在 0~8.3% 之间时, $O_2$  的加入不仅会促使  $SF_6$  与 4H-SiC 反应生成  $SO_2$  和  $CO_2$  等挥发性产物,加速 4H-SiC 材料的刻蚀,还可以防止非挥发性产物残留在 4H-SiC 表面形成微掩模,降低 4H-SiC 刻蚀表面的粗糙度。随着  $O_2$  含量继续增加, $SF_6$  浓度逐渐降低,4H-SiC 刻蚀速率随着氟基等离子体浓度的降低而减小。此外,随着  $O_2$  含量增加,刻蚀偏压逐渐增大,物理刻蚀加快,增大了 4H-SiC 刻蚀表面的粗糙度。

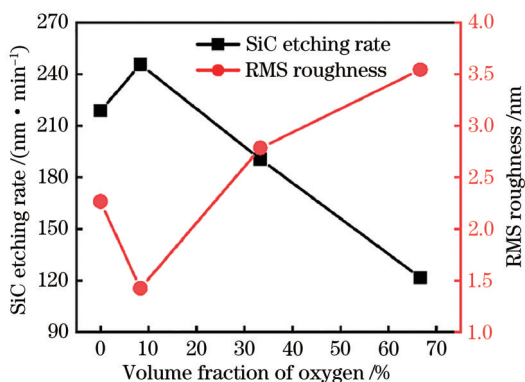


图 11  $O_2$  含量对 4H-SiC 刻蚀速率及表面 RMS 粗糙度的影响

Fig. 11 Effect of  $O_2$  content on 4H-SiC etching rate and surface RMS roughness

### 3.2.4 腔体压强对 4H-SiC 刻蚀速率及表面 RMS 粗糙度的影响

实验中设置  $SF_6$  的流量为 330 mL/min,  $O_2$  流量为 30 mL/min, 腔体压强从 4 Pa 逐渐增加到 9.8 Pa, 射频功率为 300 W, 温度为 20 °C。图 12 显示了腔体压强对 4H-SiC 刻蚀速率及刻蚀表面 RMS 粗糙度的影响。从图中可以看出,当腔体压强为 4 Pa 时,4H-SiC 的刻蚀速率最大(292.3 nm/min),4H-SiC 刻蚀表面的 RMS 粗糙度最小(0.56 nm)。这是由于随着腔体压强的增加,分子平均自由行程减小,等离子体在到达被刻蚀表面之前发生碰撞的概率增加,刻蚀的方向性减弱。刻蚀偏压随着腔体压强的增大而减小,进一步弱化了 4H-SiC 的刻蚀方向性。因此,随着腔体压强增加,4H-SiC 的刻蚀速率逐渐降低,表面 RMS 粗糙度逐渐增大。

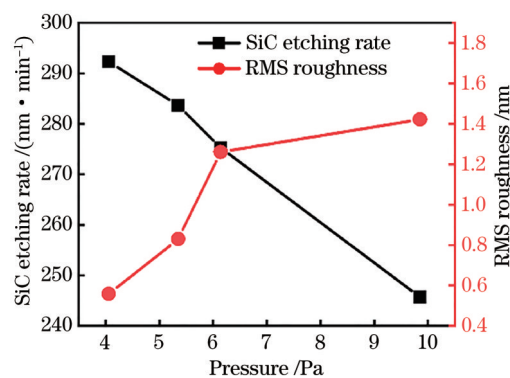


图 12 腔体压强对 4H-SiC 刻蚀速率及表面 RMS 粗糙度的影响

Fig. 12 Effect of chamber pressure on 4H-SiC etching rate and surface RMS roughness

### 3.2.5 射频功率对 4H-SiC 刻蚀速率及表面 RMS 粗糙度的影响

实验中设置  $SF_6$  的流量为 330 mL/min,  $O_2$  流量为 30 mL/min, 腔体压强为 4 Pa, 射频功率从 200 W 逐渐增加到 400 W, 温度为 20 °C。图 13 显示了射频功率对 4H-SiC 刻蚀速率及刻蚀表面粗糙度的影响。从图中可以看出:随着射频功率增加,4H-SiC 的刻蚀速率逐渐增大,且增长速率逐渐减缓,表面 RMS 粗糙度呈现先减小后增大的趋势;当射频功率为 400 W 时,4H-SiC 刻蚀速率最大(309.1 nm/min);当射频功率为 300 W 时,4H-SiC 刻蚀表面 RMS 粗糙度最小(0.56 nm)。当射频功率低于 300 W 时,4H-SiC 材料的化学刻蚀占主导,射频功率增加导致  $SF_6$  和  $O_2$  的电离率增大,等离子体密度增加,从而导致 4H-SiC 的刻蚀速率增大,4H-SiC 刻蚀表面粗糙度减小。随着射频功率继续增加,等离子体电离率

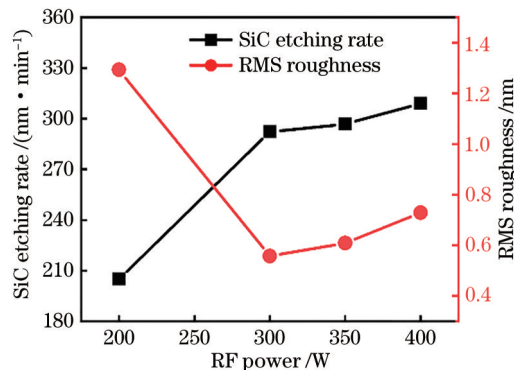


图 13 射频功率对 4H-SiC 刻蚀速率及表面 RMS 粗糙度的影响

Fig. 13 Effect of RF power on 4H-SiC etching rate and surface RMS roughness



的变化幅度减小,刻蚀速率的增大逐步变缓。同时,随着射频功率增加,刻蚀偏压逐渐增大,物理刻蚀对 4H-SiC 刻蚀速率和刻蚀表面粗糙度的影响变大。因此,当射频功率超过 300 W 后,4H-SiC 刻蚀速率和刻蚀表面粗糙度均缓慢增大。

## 4 结 论

本文首先通过优化光刻工艺参数获得良好的光刻图形形貌,改善刻蚀掩模的剥离效果;然后研究刻蚀气体( $\text{SF}_6$ 和  $\text{O}_2$ )、腔体压强以及射频功率等工艺参数对 4H-SiC 刻蚀速率以及刻蚀表面粗糙度的影响。根据实验结果可以得出以下结论:

1) RIE 刻蚀之前增加氧等离子体干法清洗工艺,可以彻底去除残余光刻胶,降低 4H-SiC 刻蚀表面 RMS 粗糙度,提升刻蚀表面质量。

2) 随着  $\text{O}_2$  含量的增加,4H-SiC 刻蚀速率呈现先增大后减小的趋势,当  $\text{O}_2$  的体积分数为 8.3% 时,4H-SiC 的刻蚀速率达到最大值。4H-SiC 刻蚀速率随着腔体压强的增加而逐渐减小,当腔体压强为 4 Pa 时,4H-SiC 的刻蚀速率达到最大值。4H-SiC 刻蚀速率随着射频功率的增大而增大,且增长速率逐渐减缓,当射频功率为 400 W 时,4H-SiC 的刻蚀速率达到最大值。

3) 随着  $\text{O}_2$  含量的增加,4H-SiC 刻蚀表面粗糙度呈现先减小后增大的趋势,当  $\text{O}_2$  的体积分数为 8.3% 时,4H-SiC 表面 RMS 粗糙度达到最小值。4H-SiC 刻蚀表面粗糙度随腔体压强的增加而逐渐增大,当腔体压强为 4 Pa 时,4H-SiC 表面 RMS 粗糙度达到最小值。随着射频功率增加,4H-SiC 刻蚀表面粗糙度呈现先减小后增大的趋势,当射频功率为 300 W 时,4H-SiC 刻蚀表面 RMS 粗糙度达到最小值。

综上,当  $\text{SF}_6$  的流量为 330 mL/min,  $\text{O}_2$  流量为 30 mL/min、腔体压强为 4 Pa、射频功率为 300 W 时,4H-SiC 的刻蚀速率可以达到 292.3 nm/min, RMS 粗糙度为 0.56 nm,可以满足 4H-SiC 微机电器件(如压力传感器、微波功率半导体器件等)研制的要求。

## 参 考 文 献

[1] Yonenaga I. Thermo-mechanical stability of wide-bandgap semiconductors: high temperature hardness of SiC, AlN, GaN, ZnO and ZnSe[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2001, 308/309/310: 1150-1152.

[2] Nie Y, Wang Y Y, Wu X Q, et al. Ultrafast carrier dynamics in n-type and semi-insulating 6H-SiC crystals[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(6): 063201.  
聂媛, 王友云, 吴雪琴, 等. n型与半绝缘 6H-SiC 晶体的超快载流子动力学[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(6): 063201.

[3] Yang C, Li F K, Ren T, et al. Fast and high quality composite processing method for silicon carbide wafers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1322001.  
杨超, 李福坤, 任婷, 等. 碳化硅晶圆的快速高质量复合加工方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1322001.

[4] Chen X H, Li X, Wu C, et al. Influence of water jet assisted laser processing silicon carbide[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011405.  
陈雪辉, 李翔, 吴超, 等. 水射流辅助激光加工碳化硅的影响研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011405.

[5] Liu R, Wu H, Zhang H D, et al. A dry etching method for 4H-SiC via using photoresist mask[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2020, 531: 125351.

[6] McDaniel G, Lee J W, Lambers E S, et al. Comparison of dry etch chemistries for SiC[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1997, 15(3): 885-889.

[7] Xia J H, Rusli, Choy S F, et al.  $\text{CHF}_3\text{-O}_2$  reactive ion etching of 4H-SiC and the role of oxygen[J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83(2): 381-386.

[8] Liu G, Xu Y, Xu C, et al. Effects and mechanisms of RIE on SiC inversion layer mobility and its recovery[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 324: 30-34.

[9] Liu Y H, Sun Y J, Zhao G J, et al. Crystal structure induced residue formation on 4H-SiC by reactive ion etching[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(6): 065219.

[10] Jiang L D, Cheung R, Brown R, et al. Inductively coupled plasma etching of SiC in  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  and etch-induced surface chemical bonding modifications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(3): 1376-1383.

[11] Zhang Y, Li R L, Zhang Y J, et al. Indiscriminate revelation of dislocations in single crystal SiC by inductively coupled plasma etching[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(9): 2831-2838.

[12] Li J J, Cheng X H, Wang Q, et al. Morphology improvement of SiC trench by inductively coupled plasma etching using Ni/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  bilayer mask[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*,

- 2017, 67: 104-109.
- [13] Chen G, Li Z Y, Chen Z, et al. Study of metal mask in 4H-SiC MESFET process[J]. Semiconductor Technology, 2008, 33(S1): 241-243.  
陈刚, 李哲洋, 陈征, 等. 4H-SiC MESFET 工艺中的金属掩膜研究[J]. 半导体技术, 2008, 33(S1): 241-243.
- [14] Ozgur M, Pedersen M, Huff M. Comparison of the etch mask selectivity of nickel and copper for a deep, anisotropic plasma etching process of silicon carbide (SiC) [J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2018, 7(2): 55-59.
- [15] Zhang W, Sun Y P, Liu B. Rapid and uniform etching of SiC materials by NLD[J]. Micronanoelectronic Technology, 2015, 52(1): 54-58, 63.  
张伟, 孙元平, 刘彬. SiC 材料的 NLD 快速均匀刻蚀[J]. 微纳电子技术, 2015, 52(1): 54-58, 63.
- [16] Tasaka A, Kotaka Y, Oda A, et al. Smoothing single-crystalline SiC surfaces by reactive ion etching using pure  $\text{NF}_3$  and  $\text{NF}_3/\text{Ar}$  mixture gas plasmas[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2014, 32(5): 051303.
- [17] Tseng Y H, Tsui B Y. Microtrenching-free two-step reactive ion etching of 4H-SiC using  $\text{NF}_3/\text{HBr}/\text{O}_2$  and  $\text{Cl}_2/\text{O}_2$ [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2014, 32(3): 031601.
- [18] Kathalingam A, Kim M R, Chae Y S, et al. Self assembled micro masking effect in the fabrication of SiC nanopillars by ICP-RIE dry etching[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(9): 3850-3855.
- [19] Ito H, Kuwahara T, Kawaguchi K, et al. Tight-binding quantum chemical molecular dynamics simulations for the elucidation of chemical reaction dynamics in SiC etching with  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  plasma[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2016, 18(11): 7808-7819.
- [20] Efremov A, Kang S, Kwon K H, et al. Etching characteristics and mechanisms of SiC thin films in inductively-coupled  $\text{HBr-Ar}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  plasmas[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2011, 29(6): 06B103.
- [21] Zhuang S W, Tang J L, Gu Z Q, et al. Microscale pattern etch of 4H-SiC by inductively coupled plasma [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30(20): 18788-18793.
- [22] Sun Y N, Shi Y B, Wang H, et al. A mask material for SiC ICP etching[J]. Micronanoelectronic Technology, 2017, 54(7): 499-504.  
孙亚楠, 石云波, 王华, 等. 碳化硅 ICP 刻蚀的掩膜材料[J]. 微纳电子技术, 2017, 54(7): 499-504.
- [23] Cui H B, Liang T, Xiong J J, et al. Study on etch rate and surface morphology of silicon carbide by ICP[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(9): 1-3, 7.  
崔海波, 梁庭, 熊继军, 等. 碳化硅 ICP 刻蚀速率及表面形貌研究[J]. 仪表技术与传感器, 2015(9): 1-3, 7.
- [24] SaifAddin B K, Almogbel A, Zollner C J, et al. Fabrication technology for high light-extraction ultraviolet thin-film flip-chip (UV TFFC) LEDs grown on SiC[J]. Semiconductor Science and Technology, 2019, 34(3): 035007.
- [25] Osipov A A, Iankevich G A, Speshilova A B, et al. High-temperature etching of SiC in  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  inductively coupled plasma[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 19977.
- [26] Choi J H, Latu-Romain L, Bano E, et al. Fabrication of SiC nanopillars by inductively coupled  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  plasma etching[J]. Journal of Physics D, 2012, 45(23): 235204.
- [27] Fan W Z, Qiao D Y. Micro electromechanical systems [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2011: 77-81.  
范伟政, 乔大勇. 微机电系统[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2011: 77-81.
- [28] Tong J M, Ning Y W, Yan W, et al. Design for adjusting gap mechanism in proximity aligner[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(7): 43-44.  
佟军民, 宁玉伟, 严伟, 等. 接近式光刻机间隙分离机构设计[J]. 机械设计与制造, 2008(7): 43-44.